

## 本州四国連絡橋・耐風に関する研究

鋼構造委員会 本州四国連絡橋耐風研究小委員会

### 1. ま え が き

島づたいに本州と四国を連絡しようという構想はかなり以前から立てられていたようであるが、第二次世界大戦後、技術上の問題として初めて具体的に取り上げたのは、当時の神戸市長原口忠次郎氏であろう。

その後、昭和30年には日本国有鉄道が明石海峡の海底トンネル建設の可能性について調査を開始し、また、昭和34年には建設省が、それまで神戸市・兵庫県・徳島県・岡山県・香川県などの地方自治体で実施されていた調査を総合して、明石一鳴門ルート、岡山一香川ルート(3路線)、尾道一今治ルートに道路橋を建設すべく調査を開始した。この建設省の調査開始に伴い、日本国有鉄道は海底トンネルの計画を、明石一鳴門間、岡山一香川間の道路鉄道併用橋に切り替え、建設省と調査を分担することとなった。

一方、昭和39年には日本鉄道建設公団が新設され、日本国有鉄道の調査は同公団に引き継がれた。また、建設省は、3路線あった岡山一香川間の候補路線を、児島一坂出ルート1本にしぼって直轄調査を昭和44年度に終了し、残る調査を日本道路公団に引き継いだ。さらに昭和45年度には、本州四国連絡橋公団が設立され、それまで日本道路公団と日本鉄道建設公団が分担していた調査をすべて継承し、本州四国連絡橋の実現をめざして、大きく前進することとなった。

この間、建設省、日本国有鉄道の共同委託を受けた土木学会は、昭和36年度に本州四国連絡橋技術調査委員会を発足させ、下部組織として上部構造、下部構造各専門部会、耐風設計、耐震設計各小委員会を設け、土木工学各分野はもちろんのこと、気象・地震・航空・建築などの他分野にまたがる専門家を結集して審議を行ない、昭和39年度には本州四国連絡橋建設の技術的可能性を立証した中間報告を、また、昭和42年度には実施上の問題点と、その解決のための調査の方向を示した最終報告を作成し、委託調査の使命を果たした。

これらの諸調査を受けて実施調査を進めている本州四国連絡橋公団は、その後の調査研究の成果に基づいて上記の本州四国連絡橋技術調査委員会最終報告中の耐風設

計指針(1967)を再検討し、あわせて長大吊橋の耐風性の検証方法を検討するよう、昭和46年度に改めて土木学会に調査を委託し、これに基づいて本学会は、本州四国連絡橋耐風研究小委員会を組織し、以下に紹介するような調査・審議を行なった。

### 2. 小委員会の目的

前節で紹介した本州四国連絡橋耐風設計指針(1967)は、①架橋地点における風速の再現期待値と自然条件および構造物の規模を考慮した設計風速算定方法の制定、②風荷重の算定 および吊橋の耐風安定性確認における風洞模型実験の重視、③吊橋補剛桁の横座屈 および自励振動現象に関する 限界風速の基準の設定、④架設工事中の耐風性に関する配慮などの特徴を有し、作成当時はもちろん、現在においても、吊橋の耐風設計指針としてすぐれた内容をもつものであるが、その後の現地観測などの調査結果ならびに吊橋の耐風応答に関する研究成果に基づいて修正すべき点もある。

また、本州四国連絡橋の各予定路線には十数橋にのぼる長大吊橋が計画されているが、これらの建設を同時に開始するとすれば、それぞれの耐風性を短期間に検証することが必要になり、複数基の風洞で同時に模型実験を行なうことが予想される。この場合、実験結果の等質性を確保するためには、統一された実験方法を策定することが要望される。一方、現在のところ、風洞模型実験の結果は、通常、実橋の対風応答と若干相違する。この相違の程度を明らかにし、風洞模型実験の精度の向上をはかるには、後述するように自然風に対する各種の応答を調査しうる実験橋を建設し、その対風応答と実験結果を対比することが必要になる。

本委員会は上記の3項目、すなわち、①本州四国連絡橋耐風設計指針の改訂、②吊橋の二次元風洞模型実験基準の作成、③耐風実験橋の具体的計画の作成を目標に設置された。いうまでもなく、これらの各事項は、吊橋の耐風設計方法を確立するうえで問題とされているものであり、短い審議期間で結論に達しうるものではないが、本州四国連絡橋の着工が急がれている状況にかんがみ、審議を推進したものである。以下各項目についての

活動内容を紹介する。

### 3. 耐風設計指針の改訂

耐風設計指針(1967)の改訂に関する本州四国連絡橋公団の要望は、その後の観測資料に基づいて、できれば架橋地点別に設計風速、迎角、風向を定めること、およびその他の部分を最近の研究成果に基づいて検討することの2点であった。この要望に基づいて約9か月間審議した結果、改訂されたおもな点は次のとおりである。

① 基本風速、② 設計風速算定の際の補正係数、③ 抗力係数の一部修正、④ 横座屈限界荷重、⑤ 風洞実験方法の規定、⑥ 風の傾斜角、⑦ 自励振動の限界風速、⑧ 架設中の注意。

これら各事項の改訂の内容と問題点は、次に示すとおりである。

#### (1) 基本風速

最新の風速観測資料に基づき、それぞれ相異なる3種の方法を用いて、各架橋地点別の基本風速の推定を試みたが、推定方法により結果にかなりのばらつきを生じたので、工学的判断を加味し、地域別に基本風速を求めるとどめた。その値は、鳴門海峡地域 50 m/sec、明石海峡地域 43 m/sec、児島一坂出ルート 43 m/sec、尾道一今治ルート 40 m/sec である。ちなみに、前指針は鳴門海峡地域 50 m/sec、その他の地域 45 m/sec としている。また、風向と迎角については、十分な観測資料を欠くため、個別的には規定しないこととした。

#### (2) 設計風速算定の際の補正係数

前指針においては基本風速に構造物の高度による補正係数と、規模による補正係数を乗じて設計風速を求めるよう定められていた。今回の改訂においては、構造物の高度による補正係数は前回どおりとし、規模による補正係数のかわりに、風の乱れによる変動荷重による吊橋補剛桁としての曲げモーメントと、乱れを無視した平均風速による曲げモーメントの比から算定した補正係数を用いることとした。今後の問題点として、このような補正係数の正当性について、実橋または実験橋で確認することが必要である。

#### (3) 抗力係数

吊構造部の抗力係数は従来、特定の数値で与えられていたが、これを補剛トラスの充電率の関数として与えることとした。また、橋によっては片側3本の主ケーブル、複橋床補剛桁などが採用される見込みが大きいので、それぞれの抗力係数に関する規定を追加した。

#### (4) 横座屈の限界荷重

前指針では、吊橋補剛桁の横座屈の限界風速は、設計風速の1.7倍をこえるよう規定したが、その値が常識的な風速に比べ大きくなりすぎるきらいがあるので、補剛桁の剛性の保持を目的とする本条項の主旨にかんがみ、今回は横座屈の限界荷重が、設計荷重の1.7倍以上になるよう規定することとした。なお、この値は「道路橋示方書」中のプレートガーダーの横倒れ座屈に関する規定を参照して定めたものである。

#### (5) 風洞実験方法

従来は、空力3分力係数、自励振動の限界風速等を風洞実験により求めるよう定められていただけであるが、今回は別に風洞模型実験の方法を風洞試験基準として定め、これに準拠して実験を行なうよう規定した。

#### (6) 風の傾斜角

前指針では、設計風速が 50 m/sec 未満のとき  $\pm 10^\circ$ 、50 m/sec をこえるとき  $\pm 5^\circ$  の傾斜角を考慮するよう規定していたが、風速の鉛直成分の観測資料に基づき、風速 50 m/sec 以上で  $\pm 3^\circ$ 、風速 25 m/sec 以下で  $\pm 5^\circ$ 、その間は直線的に変化する傾斜角の範囲を与え、自励振動の限界風速と迎角の関係が、この傾斜角の範囲をおかしてはならないこととした。なお、地形などの影響により、架橋地点の風の平均傾斜角に特定の偏倚がある場合には、当然その値を考慮しなければならない。

#### (7) 自励振動の限界風速

前指針では、自励振動の限界風速は設計風速の1.2倍以上でなければならないとしたが、今回の改訂により、設計風速の算定方法を改めたので、これに伴って自励振動の限界風速は、基本風速に高度補正を施した値の1.3倍以上とすることとした。ただし、迎角がある場合には前項に示した風の傾斜角の範囲をおかさなければよい。この規定による限界風速値は、結果的には前指針の値とほぼ一致する。

#### (8) 架設中の注意

前回は架設中には30年程度の再現期間の期待値をとるよう定めていたが、架設中に考慮すべき風速の値は、強風季節と作業工程の関係に強く支配され、架設工事の責任技術者の判断にゆだねられる部分も多いので、一般的な注意をうながす表現の規定にとどめた。

検定資料と期間の不足を痛感しつつも、本州四国連絡橋の実施設設計の一助とするため、上記のような改訂を施

したが、今後の審議により、あいまいな点をさらにつめるよう努力したい。

#### 4. 二次元風洞模型試験基準

前々節に説明したように、異なった吊橋の模型を、それぞれ異なった風洞で実験した場合の実験結果の同質性を確保するために、二次元風洞模型試験基準を定めたものである。したがって、当初から本基準の対象を、本州四国連絡橋のトラス補剛吊橋に関する3分力測定実験とばね支持模型実験（いずれも二次元模型による）に限定した。

吊橋のように非流線形物体の対風応答は風洞模型実験によって求めるしか方法がないのであるが、従来は、その実験方法について特定の基準はなく、各実験機関がそれぞれ独自の方法で実験していた。したがって、試験基準を定めるにさきだち、大学・研究機関などの主として橋梁の耐風実験に使用された21の風洞に対し、風の特性、実験方法などを問い合せ、これらを参考として本基準を定めた。

この基準の主要な特徴は

- ① 大気中の湿度が空気密度に及ぼす影響は小さいので、空気密度の計算式が水蒸気圧の項を除外したこと、
  - ② 動圧の測定に1/20 mm 読みのマンメーターを用いるよう定めたこと、
  - ③ 模型の縮尺限界、対称性の保持、風洞測定部寸法と模型寸法の関係および模型の仕上げ精度などを規定したこと、
  - ④ 用べき相似則を明確にしたこと、
  - ⑤ ばね支持模型の相似精度を定めたこと、
  - ⑥ 使用する風洞の風速分布および変動ならびに測定部の静圧分布の精度を指定したこと、
  - ⑦ 風洞実験における各種要素の範囲と最大間隔など実験方法を規制したこと、
  - ⑧ 実験結果の解析整理表示方法を統一したこと、
- などである。

すでに国内の風洞において、この風洞模型試験基準に適合するよう、実験装置などを改造または改造を計画しているものがあらわれており、実験結果の同質化に寄与している。

#### 5. 耐風実験橋

構造物の耐風性をあらかじめ検討するには、現在のところ風洞模型実験に頼らざるを得ないが、風洞実験においては、① 通常模型の縮尺が著しく小さくなり、相似条件のすべてを厳密に満足させることがむずかしい、② 一

般に風洞実験は一様に整流された気流のもとで実施されており、自然風の時間的および空間的変動の影響を反映することができない、③ 現在の技術では、風洞気流を変動する自然風に相似させることは困難である、などの理由により、風洞模型実験結果から推定した実橋の対風応答の信頼性については検討の余地がある。

この模型実験結果と実橋挙動の対応性を検討するには強風下における実橋の挙動を観測し、実験結果と対比するのが最上の方法であるが、設計条件に相当するような強風を実橋が受ける機会が非常にまれであること、長大な実橋の全体にわたって風および構造物の応答を正確に測定するのは困難であることなどにより、必ずしも最適な方法とはいえない。

これに対し、比較的低い風速でも不安定現象を示し、かつ最悪の場合には破壊してもさしつかえない実験橋を設置することができれば、この実験橋の風洞模型実験結果と、その強風下の挙動を測定対比することにより、より正確に実験結果を評価することができる。耐風実験橋は、このような目的のために建設されるものである。

当小委員会との協議のもとに、本州四国連絡橋公団は中央径間長1500 mの吊橋の1/10の三次元実験橋と、同縮尺の二次元実験橋（補剛桁の部分模型）を計画し、当小委員会は耐風実験橋作業班を設けて計画内容の作成にあたることになった。

耐風実験橋を計画する場合、まず問題となるのは設置地点である。中央径間長1500 mの吊橋の1/10程度の模型を考えると、20 m/sec程度の風の頻度が高くかつ観測作業に便利な地点を選定する必要がある。当小委員会は全国の既往気象観測資料を検討の結果、数地点の候補地を選定し、実地踏査と現地における風速の簡易観測を行なったうえで、千葉県野島崎付近を設置地点として選定した。

次に中央径間長1500 mの吊橋を対象として、その1/10の縮尺の実験橋の具体的な設計を行ない、補剛トラス部材にアルミニウムを用いる必要はあるが、通常入手可能な材料により、かなり厳密な相似性を有する実験橋を製作することが可能であるとの結論を得た。

また、三次元耐風実験橋と同一縮尺の二次元実験橋（部分模型）についても検討し、風向調整のため部分模型全体をターンテーブルに載せ、模型の両側に導流壁を有し、かつ部分模型全体を、てこを介して慣性質量とつり合わせることで所要のばね長さを減小させた計画をまとめ、三次元耐風実験橋の設計とともに委託者に報告した。この二次元実験橋は本州四国連絡橋公団により、近く実施される予定である。

（委員長／執筆・大久保忠良）